

九州大学工学部 正員 〇 杉井 和朗

正員 神野 健二

学生員 日高 隆明

1. まえがき

浄水場における逆流、沉殿池における溜水の清澄化過程など流体中の粒子の運動は、工学の多くの分野において重要な問題である。このような流体中の粒子の運動特性を実験的に検討するには、流体速度、粒子速度および粒子濃度を、計測センサーにより流れの場を乱すことなく同時に測定することが必要である。そこで本研究では、非接触測定が可能であり多相系の測定に有効なレーザードップラー流速計を用い、レーザー測定体積を通過する単一球形粒子速度および移動する単一球形粒子によって影響を受ける流体速度の測定を行った。さらに実験と同一の粒子レイノルズ数での単一球形粒子運動に関する数値計算結果と実測流体速度との比較検討を行い、本計測システムの固液二相流入の適用上の問題点について検討した。

2. 実験装置

図-1に一定速度で移動する単一球形粒子の周囲の流体速度および粒子速度をレーザー流速計を用いて同時に測定するための実験装置の概略図を示す。レーザービームの通過する両側面は、ガラス板である。粒子は、半径 $R=0.475\text{ cm}$ の完全に滑らかな球形粒子を用いた。4. (ii) で示す粒子直径 $2R$ 、動粘性係数 ν 、一定粒子速度 U_p で表わされる 300 以下の粒子レイノ

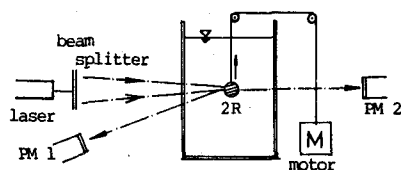


図-1 実験装置

ルズ数 $Re = 2R \cdot U_p / \nu$ での球形粒子まわりの流れの場の数値計算と実測値とを比較するために、定速回転モータにより一定粒子速度を与えた。レーザードップラー信号の受信部には、2台のフォトマルチplier PM1とPM2を使用した。この2フォトマルチplier方式によれば、流体からのドップラー信号はPM2、粒子によって反射するドップラー信号はPM1によってとらえられ、粒子速度および粒子通過前後の流体速度を同時に測定することが出来る。

3. 信号処理システム

図-2にドップラー信号をマイクロコンピュータ(CPU)内に取り込むまでの信号処理システムを示す。信号処理の手順は次のようである。

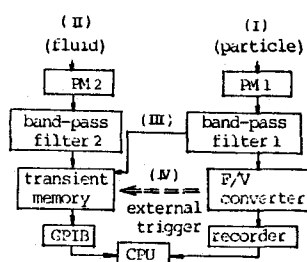


図-2 粒子及び流体速度同時測定信号処理システム

(1) 帯域通過フィルターを用いて、フォトマルチplier PM1とPM2からのドップラー信号の低周波のペDESTAL信号と高周波の電気ノイズを除去する。

(2) 粒子速度：粒子からのドップラー信号は、F/Vコンバータにより電圧に換算され、レコーダに記録される。また、粒子速度のみが要求される場合には、図中(III)の方法と可能である。

(3) 流体速度：粒子直径のオーダーが数mm以下の場合には、図中(IV)

の外部トリガーを用いる。即ち、F/Vコンバータからの出力電圧をトランジエントメモリを動作させるための外部トリガーにも用いることによって、粒子のレーザー測定体積の通過を確認することが出来る。さらに、図中(II)の粒子通過前後の流体のドップラー信号をトランジエントメモリ内に記憶する。

次に、粒子直径のオーダーが数cmと大きく、粒子レイノルズ数が小さい場合には、今回使用した2048 words memoryのトランジエントメモリでは、記憶容量が小さく、図中(IV)の外部トリガーを用いると、常にレーザービームが粒子によって遮断された状態トランジエントメモリが作動することになる。したがって、流体からのドップラー信号を取り込み得ない。そこでこの場合は、外部トリガー(IV)を用いず、流体からのドップラー信号をトランジエントメモリを動作させるための内部トリガーとして用い、粒子通過前のドップラー信号を記憶する。さらに、粒子通過後の流体からのドップラー信号は、通過前の流体からのドップラー信号を無効にすることトランジエントメモリ内に記憶することが出来る。

(4) デジタル化された 2048 個のデータは、GPIB により自動制御されながら CPU 内に転送される。

(5) CPU 内でのデータ処理の方法は、まずその信号サイクルの最大値が 3 個連続して指定レベルを越える時のドップラーバーストを探し、その後の周波数計算方法は、カウンタ方式に従った。¹⁾

4. 実験結果

(i) 粒子速度 図-3 に F/V コンバータから得られる同一条件下での粒子速度の度数分布を示す。分散は少なく、この算術平均粒子速度 U_p と粒子運動をモニターしたビデオ (VTR) から読み取れる粒子速度の平均値との差は、わずか 3% 程度である。

次に別の条件下において、粒子からのドップラー信号をカウンタ方式により解析した結果、平均粒子速度 0.675 cm/s、VTR による平均粒子速度 0.68 cm/s と、両者とよく一致する。

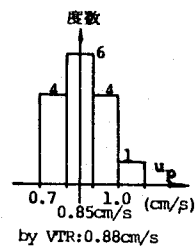


図-3 粒子速度度数分布

(ii) 数値計算結果と実測流速との比較 本計測システムの精度を比較検討するために、次の軸対称単一球形粒子運動に関する数値計算²⁾を行った。即ち、Navier-Stokes 方程式を球座標における渦度輸送方程式に変換し、さらに距離座標 $r = e^z$ の変換を行い、粒子半径 R 、一様流速 U を用いて無次元表示された

$$\frac{\partial \omega}{\partial \tau} + e^{-z} \left(\frac{\partial}{\partial z} \omega V_r + \frac{\partial}{\partial \theta} \omega V_\theta + \omega V_r \right) = 2 \frac{e^{-2z}}{Re} \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial \theta^2} + \frac{\partial \omega}{\partial z} + \cos \theta \frac{\partial \omega}{\partial \theta} - \frac{\omega}{\sin^2 \theta} \right) \quad (1)$$

$$\omega = \frac{1}{e^{3z} \sin \theta} \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial \theta^2} - \frac{\partial \psi}{\partial z} - \cos \theta \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \right) \quad (2)$$

ここに ω : 渦度, ψ : 流れ関数, V_r : 半径方向の速度, V_θ : 接線方向の速度

式(1), (2)を SOR 法を用いて Implicit に前進差分計算した。数値計算の結果、渦度が定常状態に達したときの球面の渦度分布から計算される抵抗係数 C_D は、 $Re=40$ で $C_D=1.82$, $Re=100$ で $C_D=1.06$ であった。得られた流れ関数 ψ の数値解を用いて、球の軸上流速は、 $V_r = -(e^{-2z}/\sin \theta) \partial \psi / \partial z$ により求められる。次にこの V_r を一定速度 U_p で移動する球に対する流速に換算し実験結果と比較する。

図-4 に実測値と数値計算結果による静止流体中での一定速度で移動する球中心軸上での流速分布を示す。ここに、 r は球表面を座標原点にした場合の距離座標である。黒丸は実測値、点線は同一条件下での各実験毎に F/V コンバータから得られる粒子速度の平均値を代表速度に用いた Re 数での数値解である。図中、右

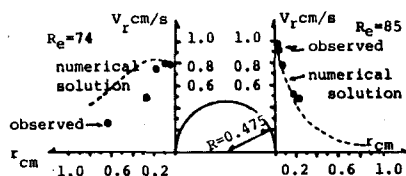


図-4 粒子通過前後の軸上流速分布

側に $U_p=0.93$, $Re=85$ の球通過前の流速分布、さらに左側に $U_p=0.78$, $Re=74$ の球通過後の流速分布を示す。なお、粒子通過前後の流速が同時に測定できなかったのは、粒子直径が 1 cm のオーダーであり、 Re 数が小さかった理由による。図-4 より、球の通過前と通過直後の実測流速分布は、数値解とよく一致しており、本計測システムの精度の高いことが判る。球の通過後の後方においては、実測値と数値解との差があるが、これは、トランジエントメモリの容量不足を補うため従来の信号読み取り時間間隔 100~50 μsec を 200 μsec に行ったこと、さらに信号強度が弱かったことからドップラーバーストがうろくともえられなかったと考えられる。

5. おわりに

一定速度で移動する粒子速度は、4. (i) で述べたように VTR によって測定可能である。しかし、VTR では流体中を加速する粒子の速度の測定、粒子の移動による影響を受ける流体速度および粒子速度の同時測定は、不可能である。本計測システムによれば、信号の SN 比が高い限り、粒子および流体速度を精度よく測定できることが判った。以上、レーザー流速計を用いた流体速度および粒子速度の測定システム確立のための基礎的研究にとどまったが、今後このシステムを種々の流体場での粒子径、粒子の比重により異なる粒子の運動特性に関する研究に応用させていきたい。本研究は、文部省科学研究費(奨励研究(A))の補助のもとに行われたものである。

参考文献 1) 日高 伸, レーザー流速計による周液二相流の流速測定について, 第36回年講, 1981
2) Rimon, Y. and Cheng, S. I., Numerical Solution of a Uniform Flow over a Sphere at Intermediate Reynolds Number, The Physics of Fluid, Vol. 12, No. 5, 1969, pp. 949-959